



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo  
*Campus São Paulo*

# **Efeito Fotoelétrico**

*3ª série Ensino Médio Integrado - 2.010*

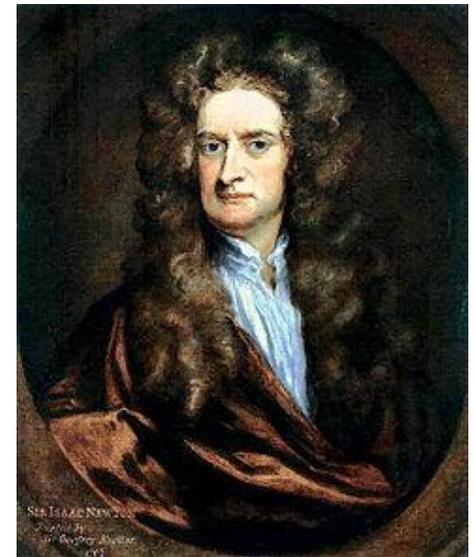
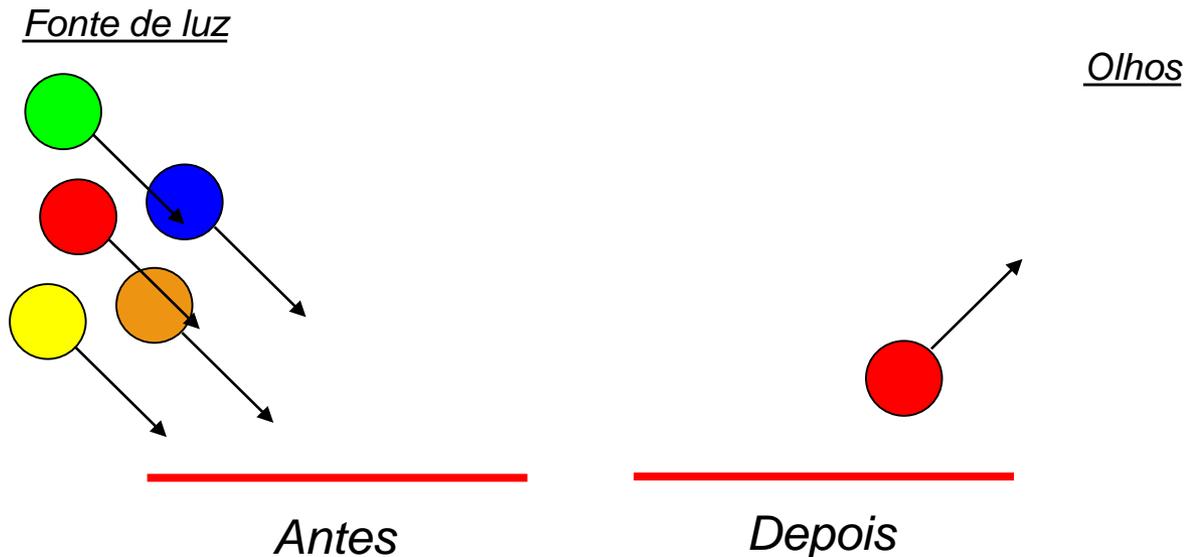
***André Cipoli  
Rogério Burgugi***

# Breve cronologia

- Isaac Newton (1640 - 1725): sucesso do modelo mecânico para explicar vários fenômenos.

## “Modelo Corpuscular da Luz”

### Reflexão da Luz



- *Christian Huygens (1629 - 1695)*

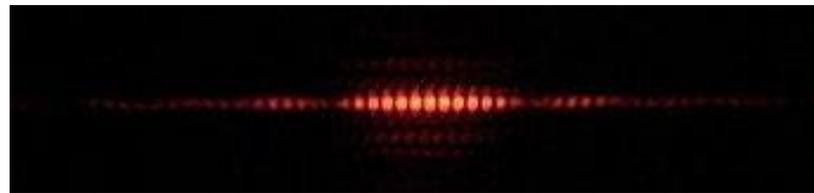
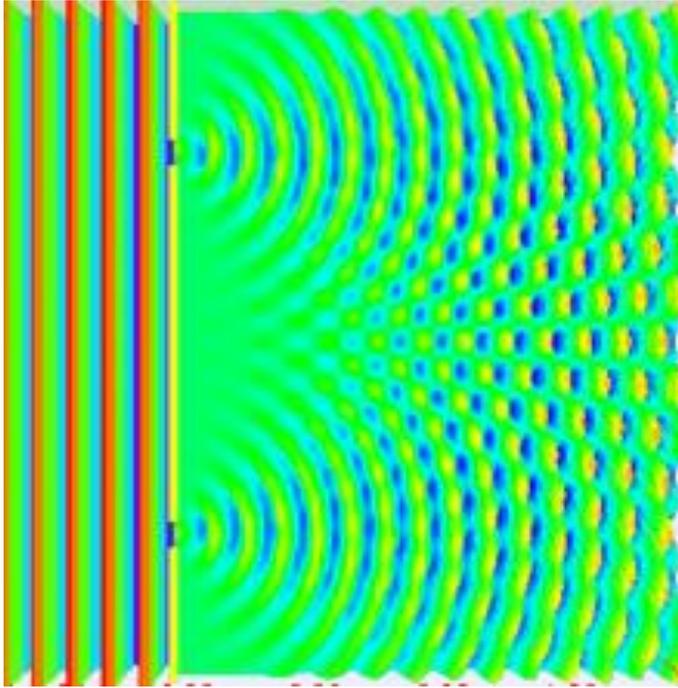


*Cuba de ondas*

*Modelo Ondulatório da Luz*

*Propagação da luz*

- *Thomas Young* (1773 - 1829)

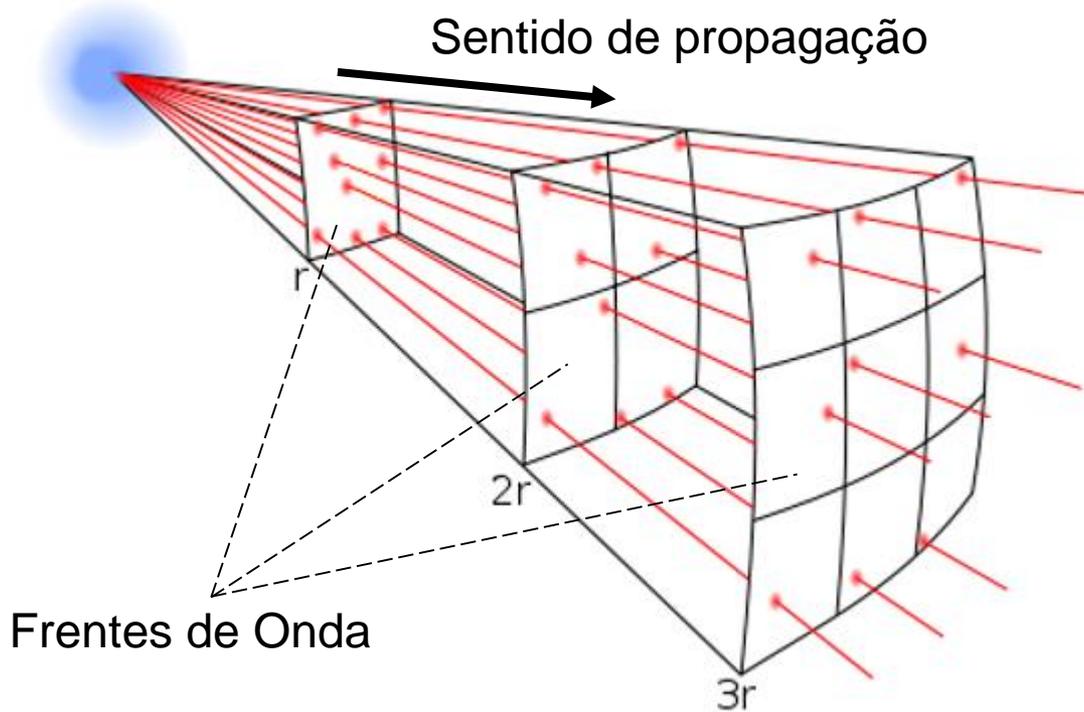


**Interferência da Luz** – experimento da dupla fenda

**1.801**

# Intensidade da Onda - L

Fonte da Onda



$$L = \frac{P}{A} = \frac{E}{A \cdot \Delta t}$$

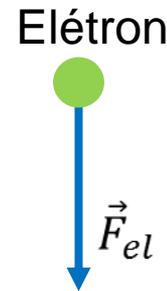
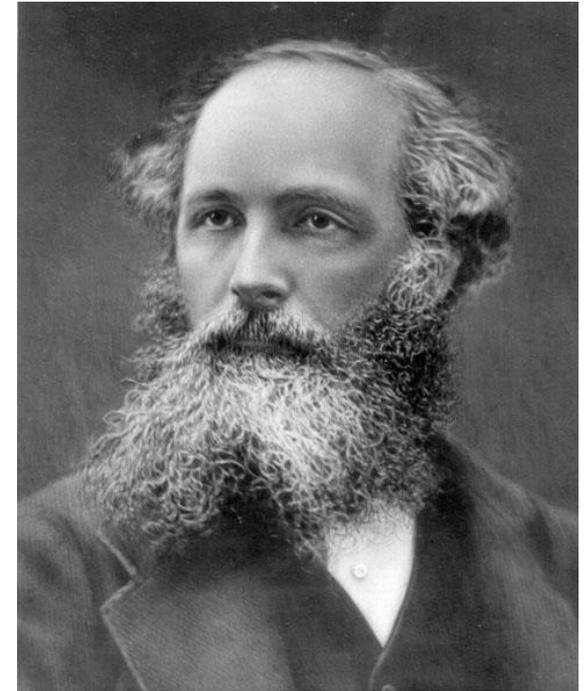
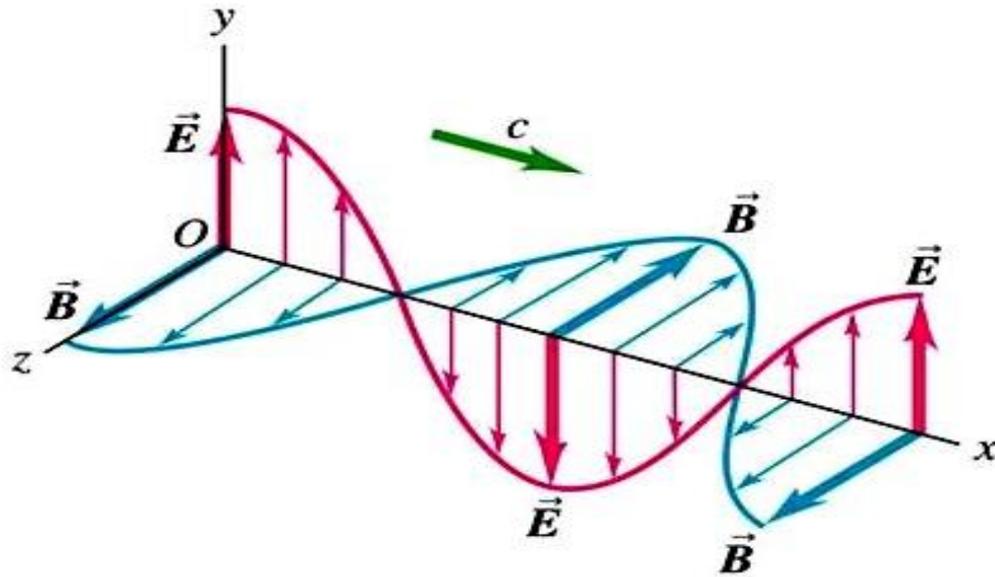
$P$  → Potência da Fonte (sonora, luminosa, sísmica etc)

$E$  → Energia da onda (sonora, luminosa, sísmica etc)

$A$  → Área da superfície esférica em movimento ( $A = 4\pi \cdot r^2$ )

$\Delta t$  → Intervalo de tempo de medição

- James Clerk Maxwell (1831 - 1879)



Teoria eletromagnética da Luz

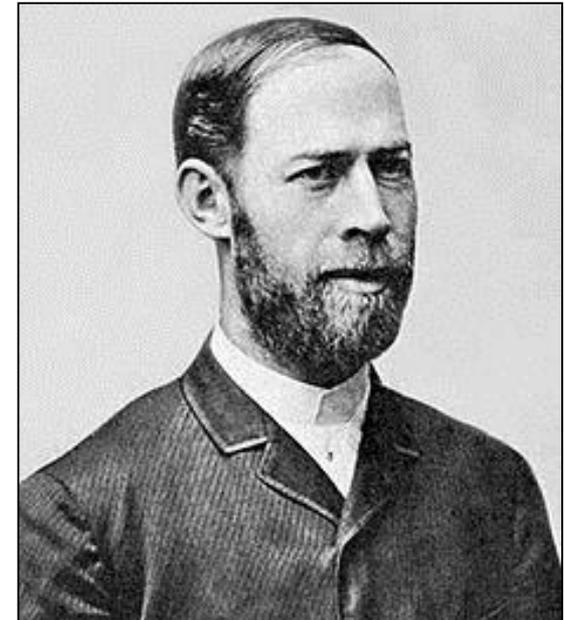
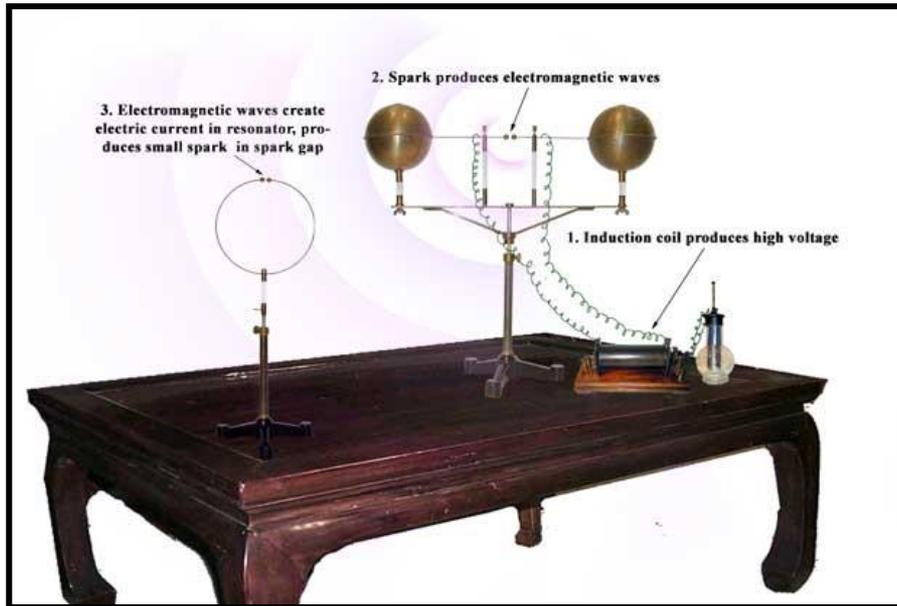
**1.873**

$$I_{onda} \propto E^2 \rightarrow \uparrow E, \uparrow F_{el}, \uparrow \tau_{F_{el}}, \uparrow Energia$$

$$\vec{F}_{el} = q \cdot \vec{E}$$

$$\tau_{F_{el}} = F_{el} \cdot d \cdot \cos \theta$$

- *Heinrich Rudolf Hertz* (1857 - 1894)

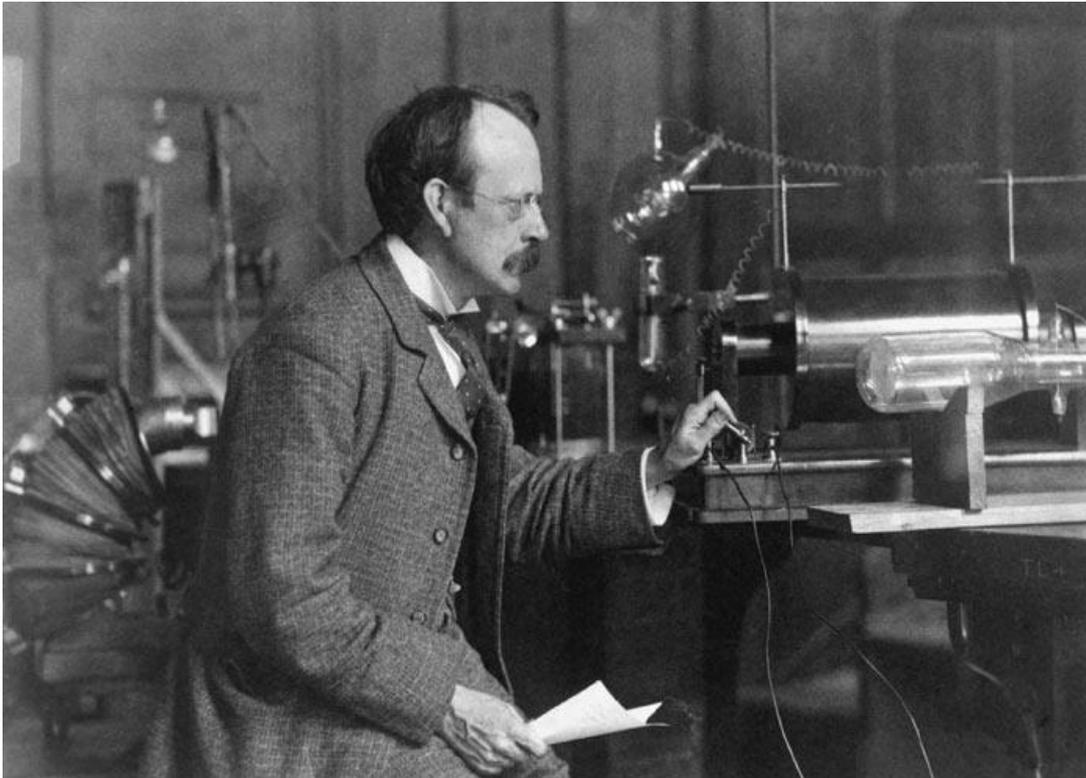


*Aparato de Hertz*

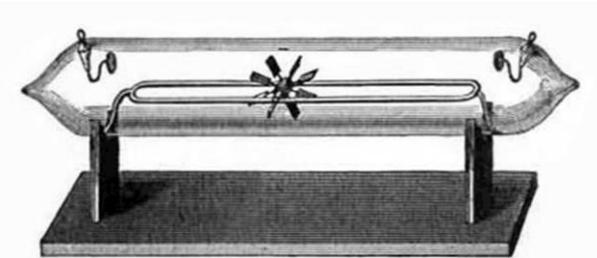
**Comprovação experimental da “*Teoria Eletromagnética Clássica de Maxwell*” - **1.887****

# • Joseph John Thomson (1856 - 1940)

*Descoberta da relação carga/massa do elétron*



Ampola de Crookes



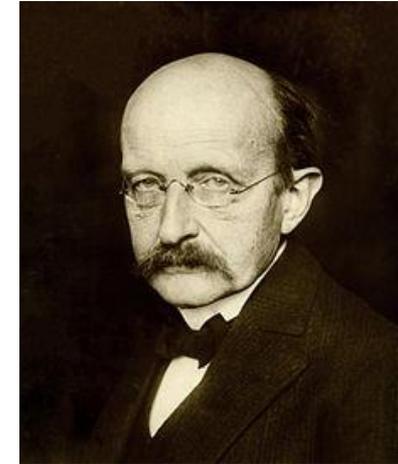
*Natureza corpuscular do elétron*

- **1.897** - tubo de raios catódicos;  $q/m = -1,76 \times 10^{-8} \text{ C/g}$
- Nobel de **1.906** (“*pelas investigações teóricas e experimentais acerca da condução de eletricidade em gases a baixa pressão*”)

- *Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858 - 1947)*

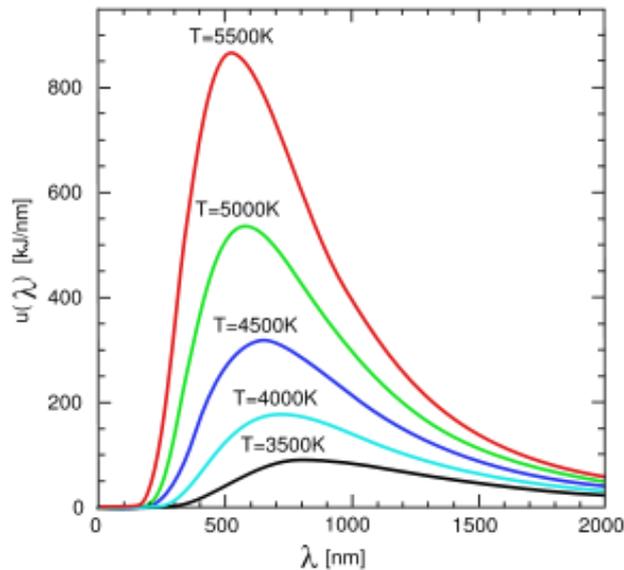


*Produção de Aço*



*Nobel de **1.918***

*“por suas contribuições na área da física quântica”*

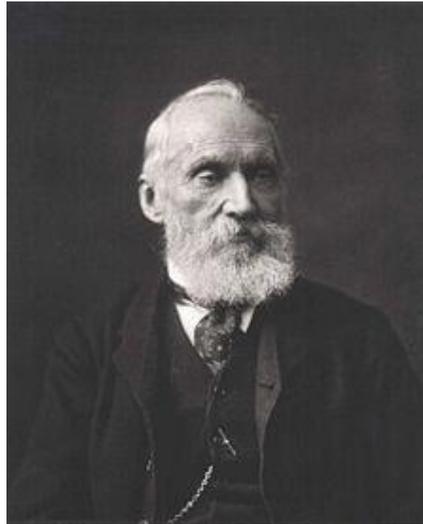


*Gráfico de Radiação Térmica*

$$u(\lambda, T) = \frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot c}{\lambda^5} \times \frac{1}{\left( e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right)}$$

*Equação de Planck*

- *William Thomson* ou “Lord Kelvin” (1824 - 1907)



*“...havia duas pequenas nuvens no horizonte da Física, era uma simples questão de tempo para serem resolvidas...”*

*Experimento de Michelson-Morley → Constância da Velocidade da Luz*

- Mecânica + Eletromagnetismo → *Relatividade*

*Radiação de Corpo Negro*

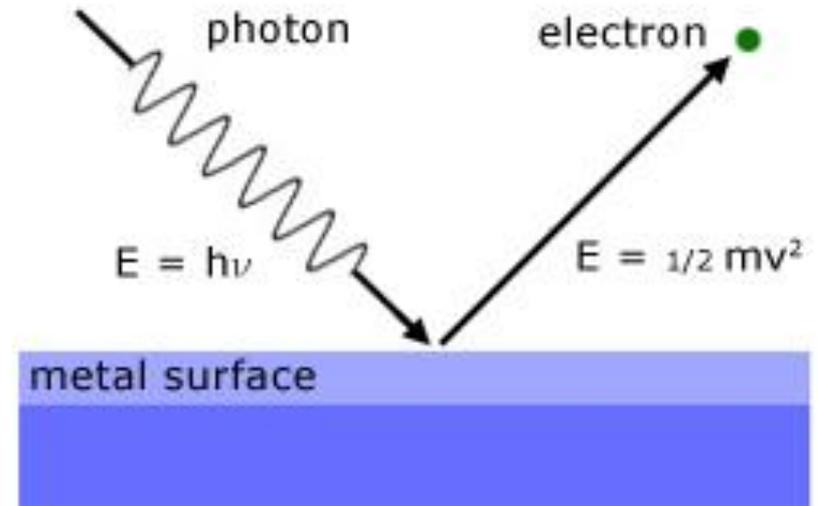
- Termodinâmica + Eletromagnetismo → *Física Quântica*

# Definição

O processo pelo qual elétrons são liberados de um material pela incidência de radiação denomina-se

## Efeito Fotoelétrico.

- A emissão de elétrons por metais iluminados com luz de **determinada** frequência foi observada, no final do século XIX, por Hertz (**1.887**), Hallwachs e Lenard.



Heinrich R. Hertz  
1857 - 1894



Wilhelm L. F. Hallwachs  
1859 - 1922



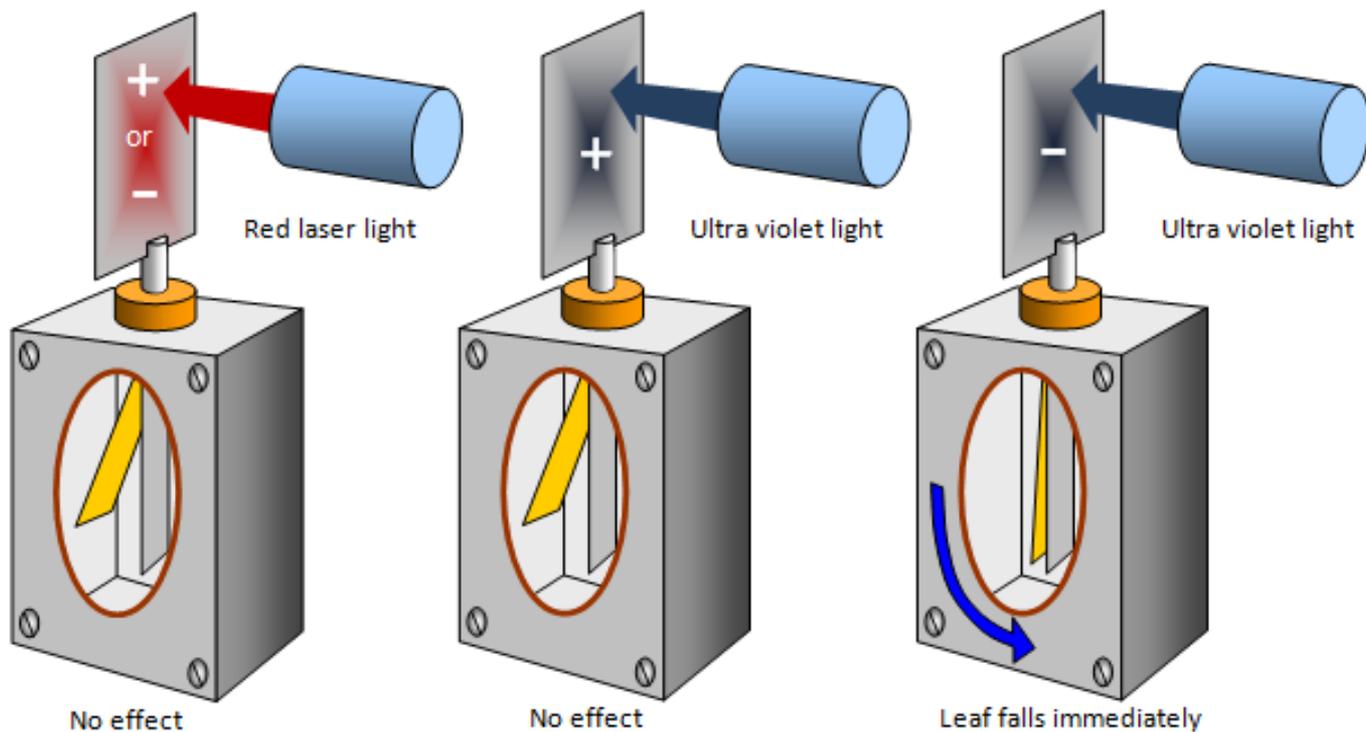
Philipp E. A. von Lenard  
1862 - 1947

Nobel de **1.905**

"for his work on  
cathode rays."

# Uma demonstração simples

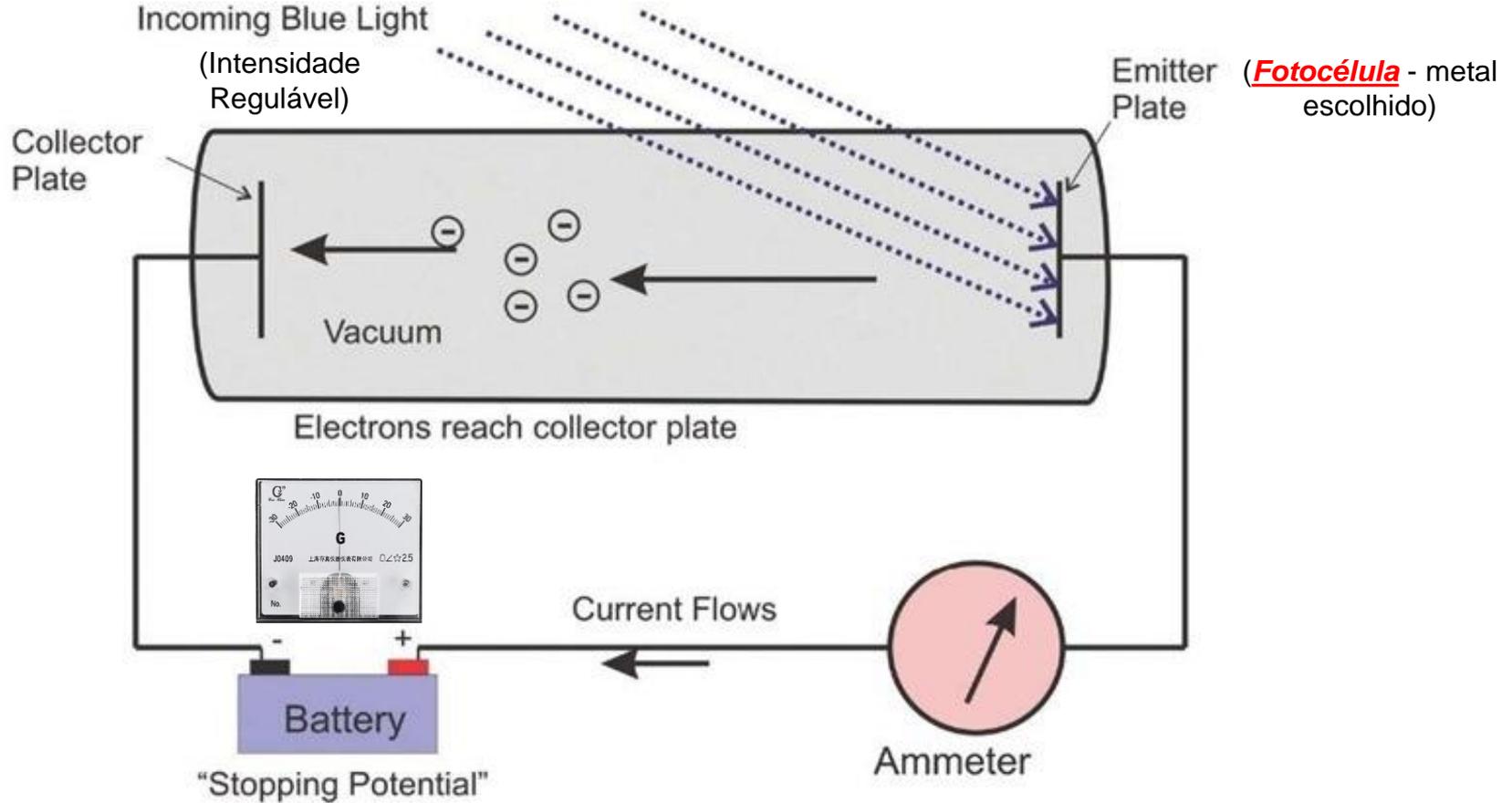
- *Eletroscópio*
- *Emissor de luz ultravioleta com variador de intensidade luminosa (L)*



Assista ao vídeo:

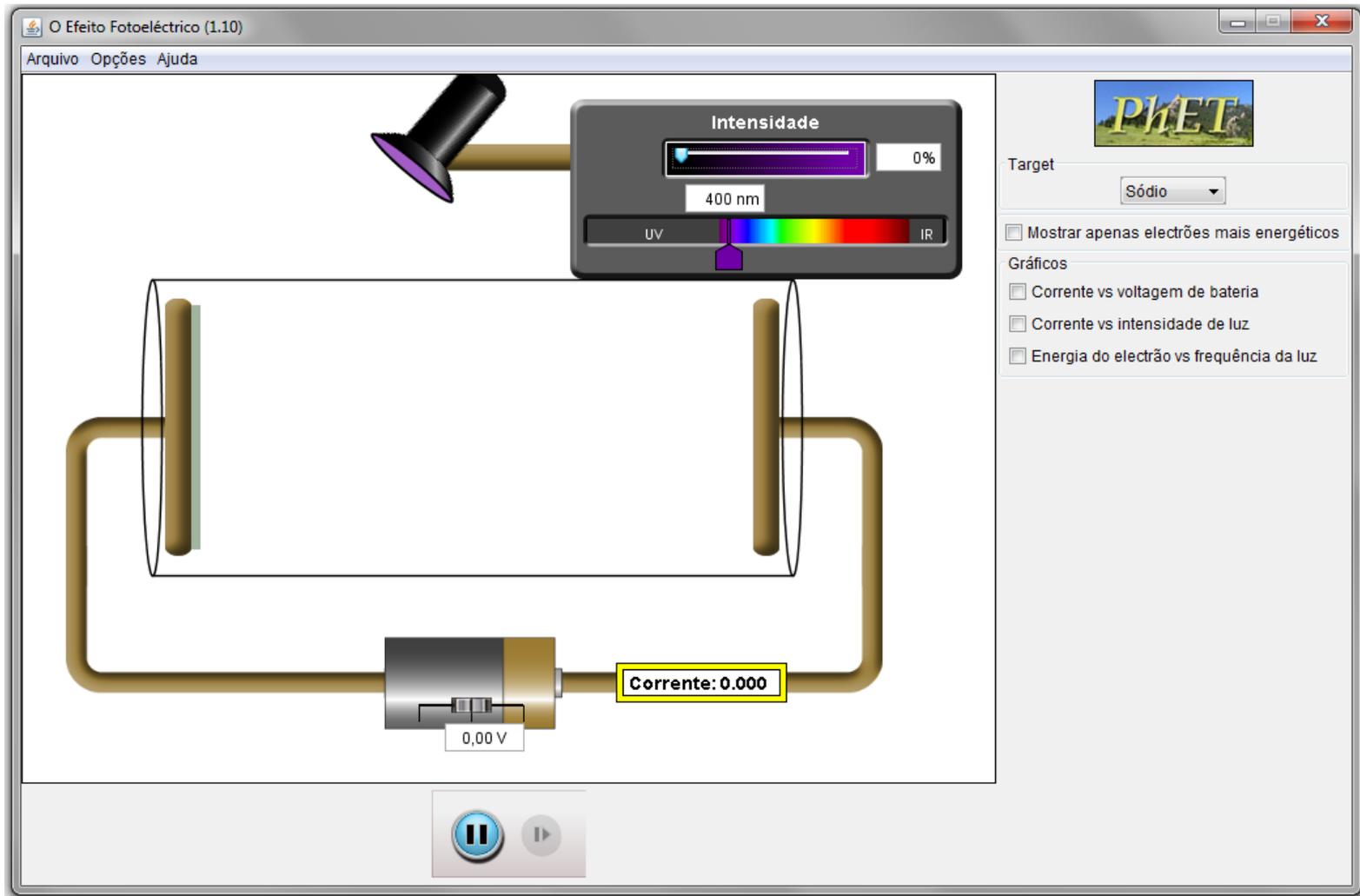
<https://www.youtube.com/watch?v=VVka6Mp5vyA>

# Equipamentos Básicos



- **Tubo evacuado com eletrodos metálicos;**
- **Bateria com regulador de tensão;**
- **Fonte de radiação;**
- **Galvanômetro** (medidor de baixas correntes).

# Simulação PhET



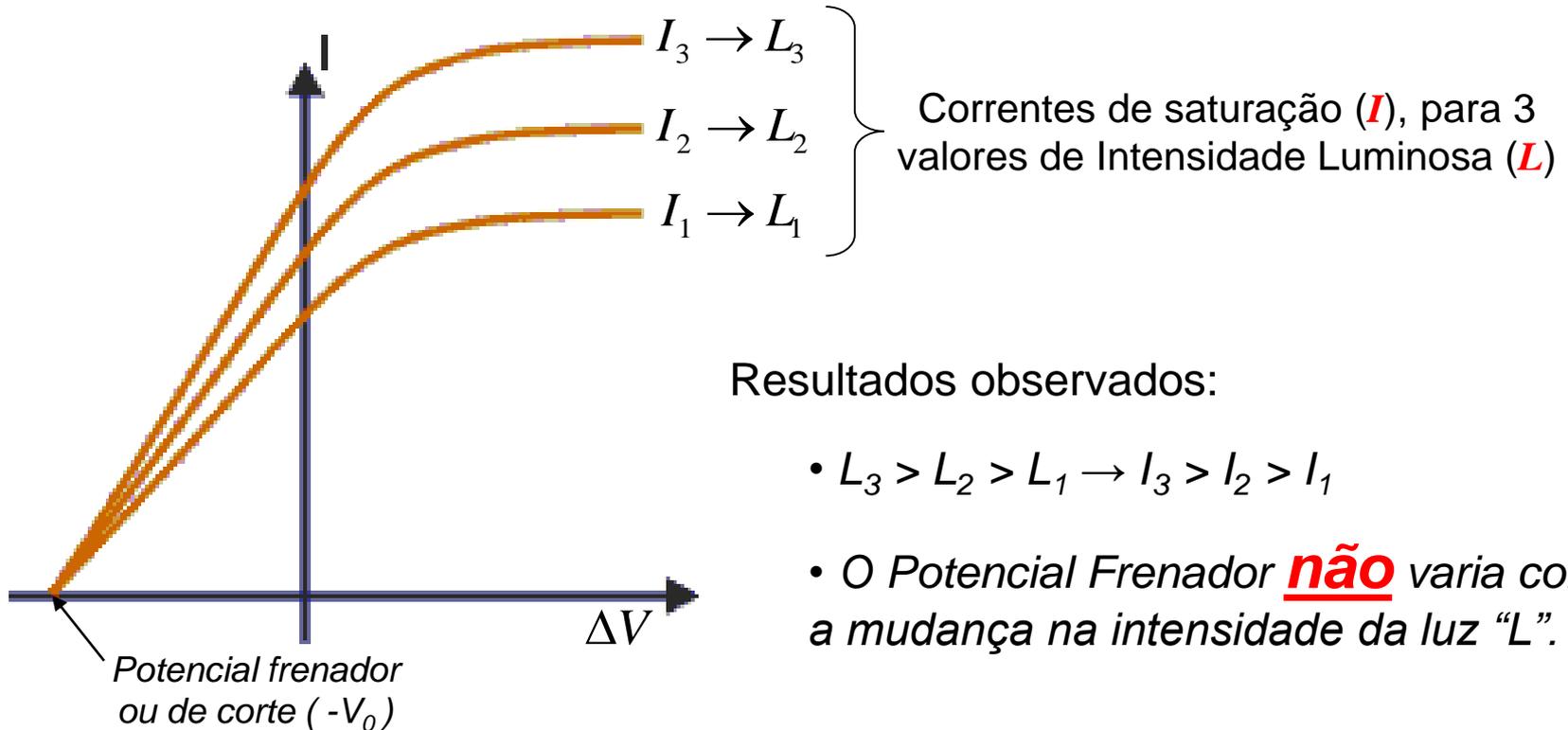
<https://phet.colorado.edu/pt/simulation/photoelectric>

<https://applets.kcvs.ca/photoelectricEffect/PhotoElectric.html>

# Resultados

Gráfico de corrente ( $I$ ) em função da tensão ( $V$ ) na fotocélula (feita com certo material)

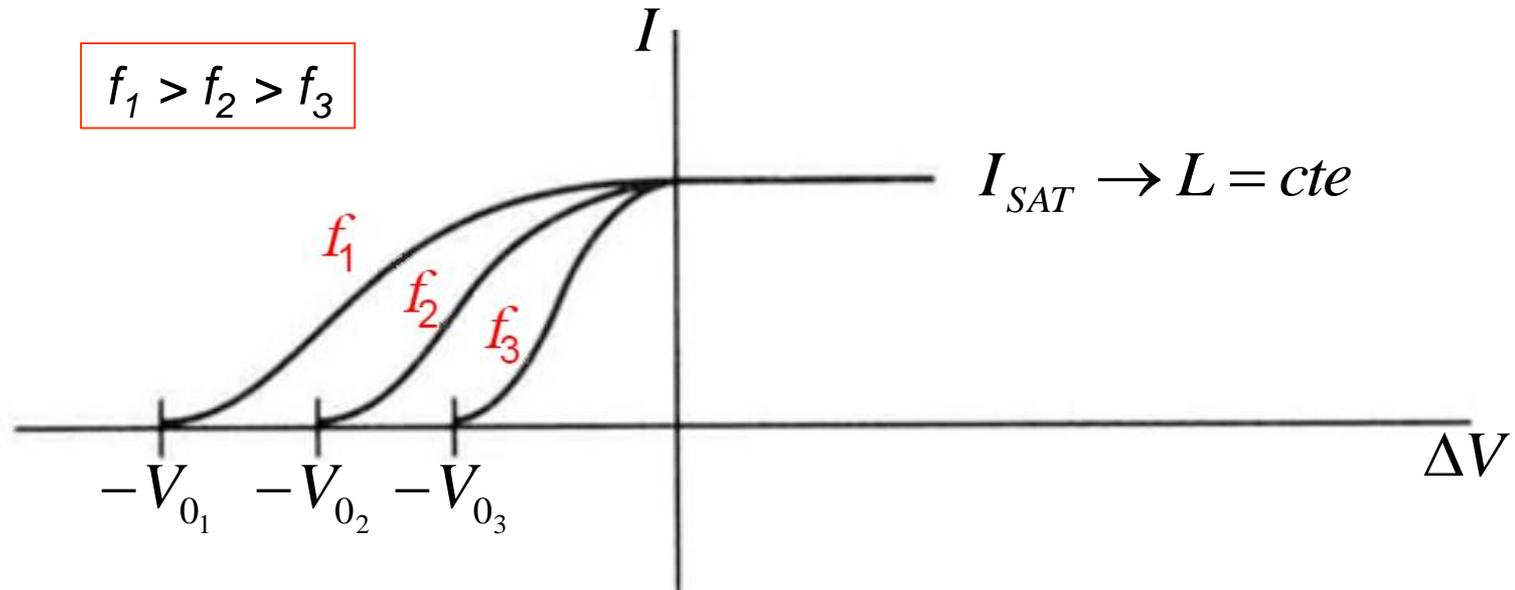
- Variando a intensidade da luz ( $L$ ), porém mantendo sua frequência ( $f$ ):



Potencial Frenador  $V_0$  é a diferença de potencial necessária para impedir que os fotoelétrons mais energéticos (isto é, **os mais rápidos**) atinjam a placa coletora, reduzindo a **zero** a corrente fotoelétrica  $I$ .

## Gráfico de corrente ( $I$ ) em função da tensão ( $\Delta V$ ) na fotocélula (feita com certo material)

- Variando a frequência da luz ( $f$ ), porém mantendo sua intensidade ( $L$ ):

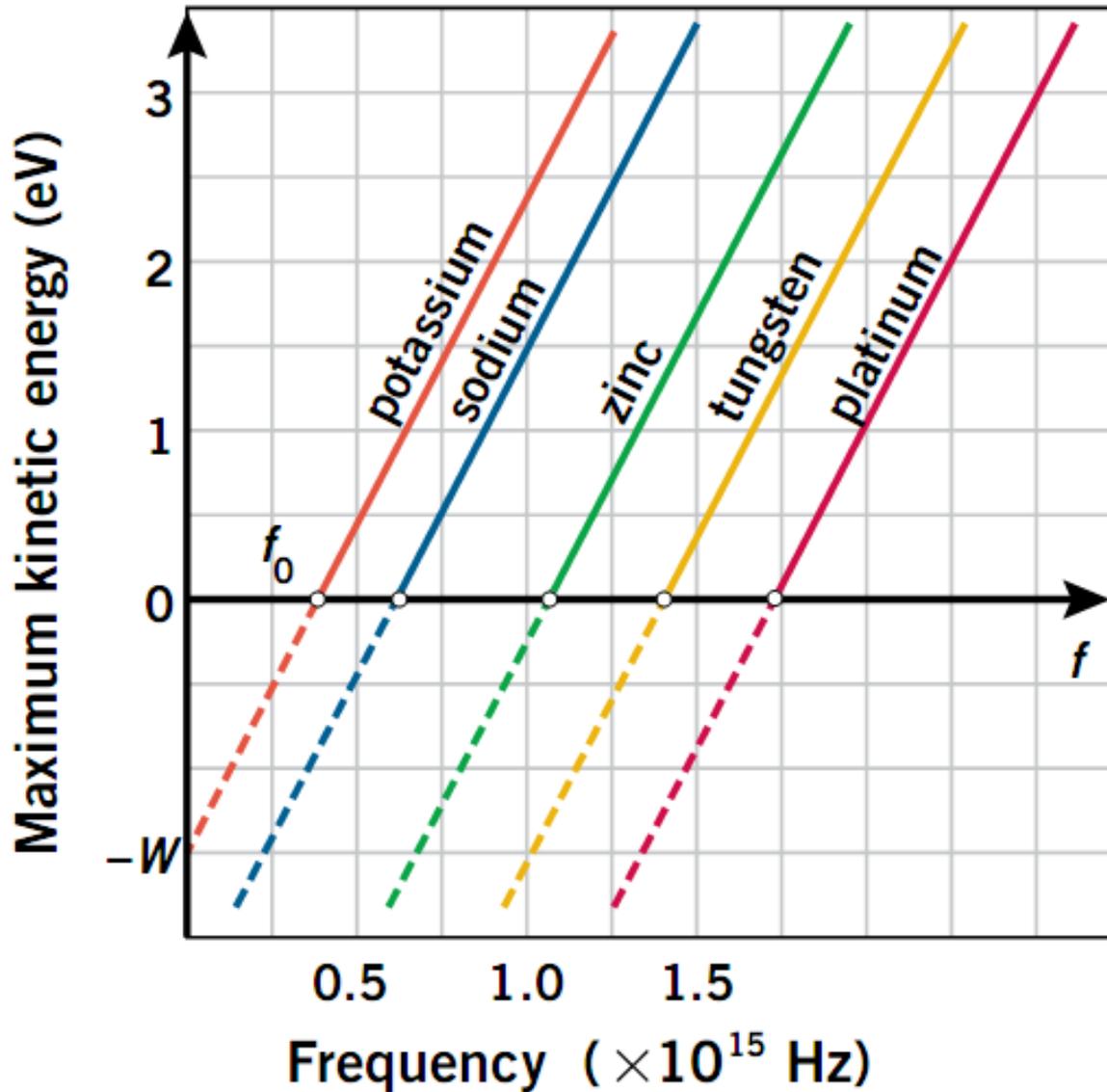


Resultado observado:

- O Potencial Frenador **aumenta**, em módulo, com o aumento da frequência da luz ( $f$ ), mantendo uma relação diretamente proporcional entre si, isto é,

$$|V_0| \propto f$$

Gráfico de Energia Cinética Máxima ( $E_{\text{CinMáx}}$ ) em função da frequência ( $f$ )  
(várias fotocélulas)



## Previsão da Física Clássica

→ O elétron deveria absorver da onda incidente uma quantidade de energia que possibilitasse sua ejeção, processo que demandaria um certo intervalo de tempo;

→ Teoria ondulatória sugeria que a energia cinética dos fotoelétrons deveria aumentar quando o feixe de radiação fosse mais intenso;

→ Desde que a radiação fosse suficientemente intensa, o efeito fotoelétrico deveria acontecer para qualquer frequência da radiação incidente.

## Características do fenômeno

- Para uma dada placa metálica, os elétrons são emitidos sem intervalo de tempo entre o início da incidência de radiação e o aparecimento de corrente elétrica;
- Com o acréscimo da intensidade da radiação, aumenta-se o número de fotoelétrons coletados (e, portanto, aumenta-se a corrente de saturação), mas não a energia cinética máxima deles;
- Luz violeta (menor comprimento de onda) de baixa intensidade ejeta somente alguns elétrons, porém a energia cinética máxima é maior que aquela para luz mais intensa, porém de comprimentos de onda maiores (luz vermelha).

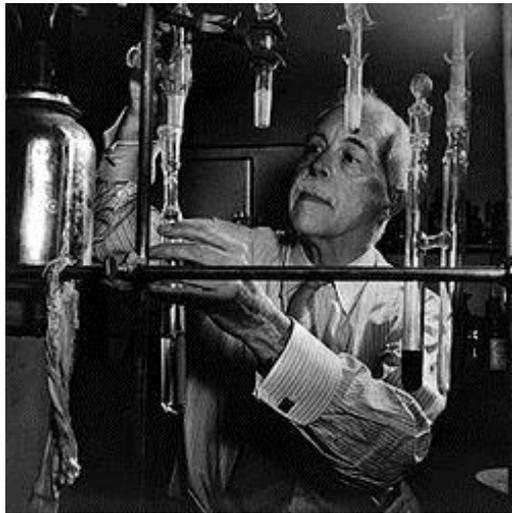
# A explicação de Einstein

Em 1.905, **Einstein** propõe que o feixe de radiação viaje no espaço em pacotes de energia, atualmente chamados **fótons**.



Albert Einstein  
1879 - 1955  
Nobel de **1.921**

"for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect."



Gilbert N. Lewis  
1875 - 1946  
*Nature* 1926

Segundo Einstein, a energia de um fóton vale

$$E = h.f$$

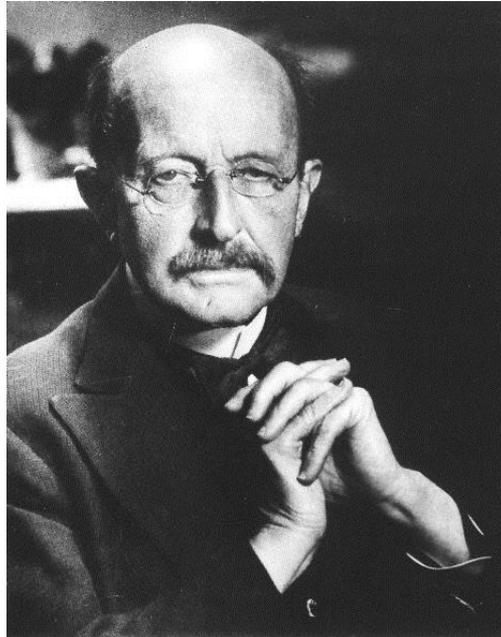
$$h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$h = 4,135668 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$$

$$E_{\text{CinMáx}} = e.\Delta V = h.f - W$$

**W** → **Função trabalho** do material (menor energia para liberar um elétron do material)

# Personalidades



*"in recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta."*

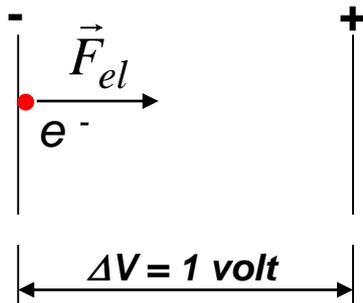
Max K. E. L. Planck

1858 - 1947

Nobel de **1.918**

- Utilização, por Einstein, da hipótese do quantum de ação  $h$ , de Max Planck, estabelecido para um fenômeno térmico (Termodinâmica), para explicar um fenômeno luminoso (Eletromagnetismo) !!!

- Conhecendo outra unidade de energia:



$$U = q_{el} \times \Delta V = E_{Cin} = \frac{1}{2} \times m_{el} \times v^2$$

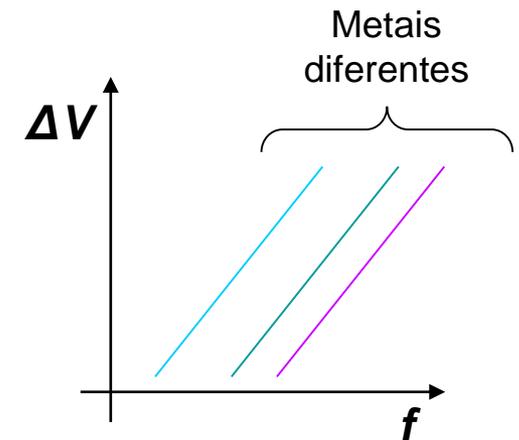
$$q_{el} = 1,602 \times 10^{-19} C = e$$

$$U = 1V \times 1,602 \times 10^{-19} C = 1,602 \times 10^{-19} [C \times V] \rightarrow J$$

$$\therefore, 1eV \rightarrow 1,602 \times 10^{-19} J$$

$$E_{CinMáx} = e \cdot \Delta V = h \cdot f - W$$

$$\frac{E_{CinMáx}}{e} = \Delta V = \frac{h}{e} \times f - \frac{W}{e}$$



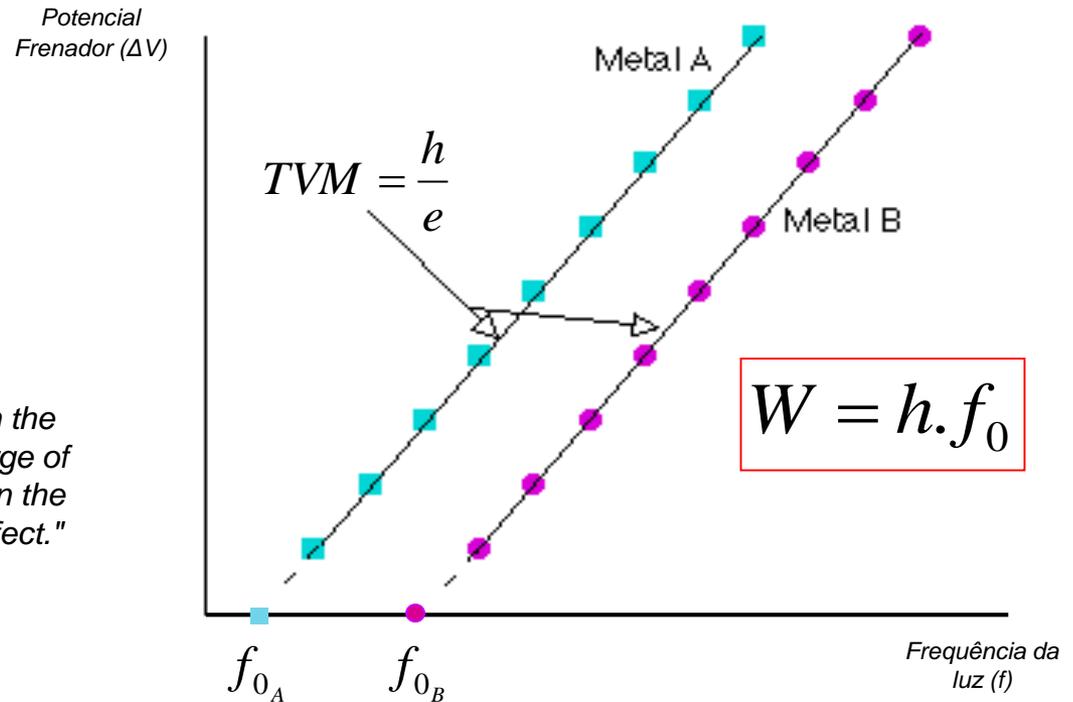
Deve ser submetida a uma verificação experimental!!

# Personalidades



Robert A. Millikan  
1868 - 1953  
Nobel de **1.923**

"for his work on the elementary charge of electricity and on the photoelectric effect."



- Determinação experimental de  **$h$**  feita por **Robert Millikan** (1.914) – valor muito próximo daquele determinado por Planck (**Termodinâmica**).

$$h \cdot f = h \cdot f_0 + E_{CinMáx}$$

$f_0$  → frequência de corte

$E_{CinMáx}$  → energia cinética máxima do elétron emitido

# Função Trabalho $W$

## Work Functions for Photoelectric Effect

Element	Work Function(eV)
Aluminum	4.08
Beryllium	5.0
Cadmium	4.07
Calcium	2.9
Carbon	4.81
Cesium	2.1
Cobalt	5.0
Copper	4.7
Gold	5.1
Iron	4.5
Lead	4.14
Magnesium	3.68
Mercury	4.5
Nickel	5.01
Niobium	4.3
Potassium	2.3
Platinum	6.35
Selenium	5.11
Silver	4.26-4.73*
Sodium	2.28
Uranium	3.6
Zinc	4.3

Função Trabalho é a energia necessária para desligar um elétron da superfície do material.

Desde que um fóton tenha uma energia  $h.f$  maior do que a função trabalho  $W$ , a diferença entre elas será transformada em energia de movimento, isto é, em **Energia Cinética**.

$$E_{PotEletr} = e.V_0 = E_{CinMáx}$$

onde  $V_0$  é o potencial frenador.

$E_{CinMáx} \rightarrow$  Energia Cinética do **fotoelétron mais rápido**

# Consequências Imediatas

Resgate da Teoria Corpuscular da Luz  
Newton (séc. XVII)

A Física Quântica começa  
a consolidar-se!!

*“Em resumo, podemos dizer que dificilmente haverá um grande problema, dos quais a física moderna é tão rica, ao qual Einstein não tenha dado uma importante contribuição. Que ele tenha algumas vezes errado o alvo em suas especulações, como por exemplo em sua hipótese dos quanta de luz (fótons), não pode ser realmente colocado contra ele, pois é impossível introduzir ideias fundamentalmente novas, mesmo nas ciências mais exatas, sem ocasionalmente correr um risco.”*

Declaração de Planck, na Academia Prussiana de Ciências, quando da indicação de Einstein para torná-lo membro (1914).

## Dualidade Onda - Partícula

# Exercícios

- 1) Determine a energia cinética máxima dos fotoelétrons se a função trabalho do material é de 2,3 eV e a frequência da radiação é de  $3,0 \times 10^{15}$  Hz. Determine a frequência de corte para o material da célula.

Resposta: 10,12 eV;  $5,75 \times 10^{14}$  Hz

- 2) A função trabalho do tungstênio é 4,5 eV. Calcule a velocidade do mais rápido fotoelétron emitido para fótons incidentes de 5,8 eV.

Resposta:  $6,76 \times 10^5$  m/s

- 3) (UDESC 2010) Analise as afirmativas abaixo, relativas à explicação do efeito fotoelétrico, tendo como base o modelo corpuscular da luz.

- I – A energia dos fótons da luz incidente é transferida para os elétrons no metal de forma quantizada.  
II – A energia cinética máxima dos elétrons emitidos de uma superfície metálica depende apenas da frequência da luz incidente e da função trabalho do metal.  
III – Em uma superfície metálica, elétrons devem ser ejetados independentemente da frequência da luz incidente, desde que a intensidade seja alta o suficiente, pois está sendo transferida energia ao metal.

Assinale a alternativa correta.

- a) Somente a afirmativa II é verdadeira.  
b) Somente as afirmativas I e III são verdadeiras.  
c) Somente as afirmativas I e II são verdadeiras.  
d) Somente a afirmativa III é verdadeira.  
e) Todas as afirmativas são verdadeiras.

- 4) (UDESC 2008) Foi determinado experimentalmente que, quando se incide luz sobre uma superfície metálica, essa superfície emite elétrons. Esse fenômeno é conhecido como efeito fotoelétrico e foi explicado em 1905 por Albert Einstein, que ganhou em 1921 o Prêmio Nobel de Física, em decorrência desse trabalho. Durante a realização dos experimentos desenvolvidos para compreender esse efeito, foi observado que:
1. os elétrons eram emitidos imediatamente. Não havia atraso de tempo entre a incidência da luz e a emissão dos elétrons.
  2. quando se aumentava a intensidade da luz incidente, o número de elétrons emitidos aumentava, mas não sua energia cinética.
  3. a energia cinética do elétron emitido é dada pela equação  $E_c = \frac{1}{2} mv^2 = hf - W$ , em que o termo  $hf$  é a energia cedida ao elétron pela luz, sendo  $h$  a constante de Planck e  $f$  a frequência da luz incidente. O termo  $W$  é a energia que o elétron tem que adquirir para poder sair do material, e é chamado função trabalho do metal.

Considere as seguintes afirmativas:

- I - Os elétrons com energia cinética zero adquiriram energia suficiente para serem arrancados do metal.
- II - Assim como a intensidade da luz incidente não influencia a energia dos elétrons emitidos, a frequência da luz incidente também não modifica a energia dos elétrons.
- III - O metal precisa ser aquecido por um certo tempo, para que ocorra o efeito fotoelétrico.

Assinale a alternativa correta.

- a) Somente a afirmativa II é verdadeira.
- b) Todas as afirmativas são verdadeiras.
- c) Somente as afirmativas I e II são verdadeiras.
- d) Somente a afirmativa III é verdadeira.
- e) Somente a afirmativa I é verdadeira.

5) (UFRGS-RS) Considere as seguintes afirmações sobre o efeito fotoelétrico.

I. O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons por uma superfície metálica atingida por radiação eletromagnética.

II. O efeito fotoelétrico pode ser explicado satisfatoriamente com a adoção de um modelo corpuscular para a luz.

III. Uma superfície metálica fotossensível somente emite fotoelétrons quando a frequência da luz incidente nessa superfície excede um certo valor mínimo, que depende do metal.

Quais estão corretas?

a) apenas I.

b) apenas II.

c) apenas I e II.

d) apenas I e III.

e) I, II e III.

6) (UFPE) Para liberar elétrons da superfície de um metal é necessário iluminá-lo com luz de comprimento de onda igual ou menor que  $6,0 \cdot 10^{-7}$  m. Qual o inteiro que mais se aproxima da frequência óptica, em unidades de  $10^{14}$  Hz necessária para liberar elétrons com energia cinética igual a 3,0 eV?

**Dados:** constante de Planck  $h = 4,14 \cdot 10^{-15}$  eV.s. Velocidade de propagação da luz no vácuo  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s

- 7) (UEPB) A descoberta do efeito fotoelétrico e sua explicação pelo físico Albert Einstein, em 1905, teve grande importância para a compreensão mais profunda da natureza da luz. No efeito fotoelétrico, os fotoelétrons são emitidos, de um cátodo C, com energia cinética que depende da frequência da luz incidente e são coletados pelo ânodo A, formando a corrente  $I$  mostrada. Atualmente, alguns aparelhos funcionam com base nesse efeito e um exemplo muito comum é a fotocélula utilizada na construção de circuitos elétricos para ligar/desligar as lâmpadas dos postes de rua. Considere que em um circuito foi construído conforme a figura e que o cátodo é feito de um material com função trabalho  $\phi = 3,0$  eV (elétron-volt). Se um feixe de luz incide sobre C, então o valor de frequência  $f$  da luz para que sejam, sem qualquer outro efeito, emitidos fotoelétrons com energia cinética máxima  $E_{\text{CINMÁX}} = 3,6$  eV, em hertz, vale:

**Dados:**

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

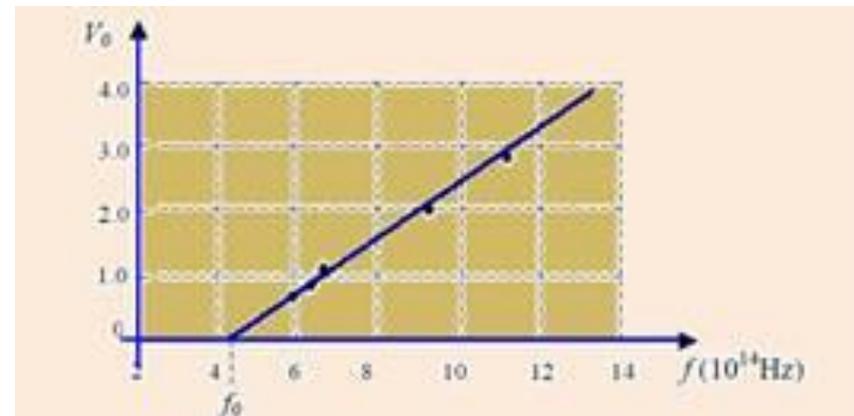
- a)  $1,6 \cdot 10^{15}$ .
- b)  $3,0 \cdot 10^{15}$ .
- c)  $3,6 \cdot 10^{15}$ .
- d)  $6,6 \cdot 10^{15}$ .
- e)  $3,2 \cdot 10$ .



- 8) (UNIMONTES-MG) No efeito fotoelétrico, elétrons são ejetados de uma superfície metálica, através da incidência de luz sobre ela. A equação de Einstein para o efeito fotoelétrico, baseada na hipótese do fóton, é  $h \cdot f = \varphi + K_m$ , em que  $h \cdot f$  é a energia do fóton absorvido pelo elétron na superfície do metal. A função trabalho  $\varphi$  é a energia necessária para se remover esse elétron do metal, e  $K_m$  a energia cinética máxima do elétron fora da superfície. Para frear o elétron ejetado da superfície, é necessário um potencial elétrico  $V_o$ , de modo que  $K_m = e \cdot V_o$ , sendo  $e$  a carga do elétron. Em termos de  $V_o$ , a equação de Einstein fica na forma  $V_o = (h/e) \cdot f - (\varphi/e)$ . Abaixo, temos um gráfico  $V_o \times f$ , para diversos experimentos realizados (os pontos pretos são obtidos de experimentos), e também um trecho de reta, contínuo, que representa a função  $V_o = F(f)$  da teoria de Einstein.

Com base nas informações do texto e no gráfico, é CORRETO afirmar que

- os elétrons, no efeito fotoelétrico, são ejetados da superfície metálica, a partir de uma certa intensidade da luz incidente.
- a energia cinética máxima do elétron ejetado é igual a  $h \cdot f$ , mesma energia do fóton incidente.
- os elétrons, no efeito fotoelétrico, são ejetados da superfície metálica, a partir de uma determinada frequência da luz incidente.
- a energia cinética máxima do elétron ejetado é igual a  $\varphi$ , mesma energia necessária para remover o elétron do metal.



9) Uma lâmpada ultravioleta emite luz com um comprimento de onda de 400 nm, com uma potência de 400 W. Uma lâmpada infravermelha emite luz com um comprimento de onda de 700 nm, também com uma potência de 400 W. (a) Qual das duas lâmpadas emite mais fótons por segundo? (b) Quantos fótons por segundo emite esta lâmpada?

10) (UFC) A função trabalho de um dado metal é 2,5 eV.

- Verifique se ocorre emissão fotoelétrica quando sobre esse metal incide luz de comprimento de onda  $\lambda = 6,0 \times 10^{-7}$  m. A constante de Planck é  $h \approx 4,2 \times 10^{-15}$  eV·s e a velocidade da luz no vácuo é  $c = 3,0 \times 10^8$  m/s.
- Qual é a frequência mais baixa da luz incidente capaz de arrancar elétrons do metal?

11) Determine a frequência de corte para um metal cuja função trabalho seja 2,3 eV. Dados: Considere a constante de Planck como  $h = 4,0 \cdot 10^{-15}$  eV·s

12) (UFMG-MG) Utilizando um controlador, André aumenta a intensidade da luz emitida por uma lâmpada de cor vermelha, sem que esta cor se altere. Com base nessas informações, é CORRETO afirmar que a intensidade da luz aumenta porque

- a frequência da luz emitida pela lâmpada aumenta.
- o comprimento de onda da luz emitida pela lâmpada aumenta.
- a energia de cada fóton emitido pela lâmpada aumenta.
- o número de fótons emitidos pela lâmpada, a cada segundo, aumenta.

13) Certa substância, quando iluminada por fótons de 4 eV, é capaz de ejetar elétrons com energia de 6 eV. Determine a módulo da função trabalho de tal substância.

14) Ao iluminarmos uma placa metálica cuja função trabalho é de 7 eV, observa-se a ejeção de elétrons com energias de 4 eV. Determine:

- a) a energia dos fótons incidentes;
- b) a frequência dos fótons incidentes.

15) A tabela abaixo mostra as frequências para três tipos distintos de ondas eletromagnéticas que irão atingir uma placa metálica cuja função trabalho corresponde a 4,5 eV. A partir dos valores das frequências podemos afirmar que:

ONDA	FREQUÊNCIA (Hz)
A	$2,5 \cdot 10^{17}$
B	$3,0 \cdot 10^{18}$
C	$5,0 \cdot 10^{16}$
D	$4,5 \cdot 10^{15}$

Dados: Considere a constante de Planck igual a  **$h = 4,0 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$** , e a velocidade da luz no vácuo,  **$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$** .

- a) A onda C possui frequência menor que a frequência de corte.
- b) A energia cinética do fotoelétron atingido pela onda D é de 13,5 eV.
- c) O efeito fotoelétrico não ocorrerá com nenhuma das ondas.
- d) A razão entre a frequência de corte e a frequência da onda A é 0,085.
- e) O comprimento de onda referente à onda B é  $2,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ .

16) Sobre o efeito fotoelétrico, marque a alternativa correta:

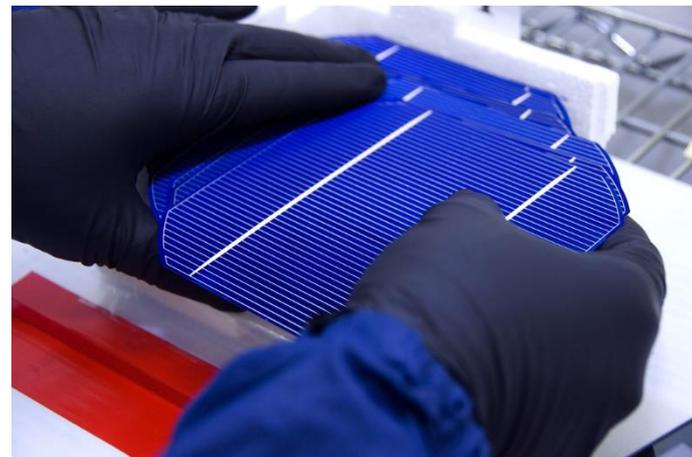
- a) O efeito fotoelétrico depende da intensidade da radiação incidente sobre a placa metálica.
- b) Não há frequência mínima necessária para a ocorrência desse fenômeno.
- c) A frequência de corte é fruto da razão entre a função trabalho e a constante de Planck.
- d) A energia cinética dos fotoelétrons é diretamente proporcional ao comprimento de onda da radiação incidente.

# **Referências sitigráficas**

- <http://focus.aps.org/story/v3/st23>
- [http://cref.if.ufrgs.br/~betz/iq\\_XX\\_A/fotoElec/aFotoElecText.htm](http://cref.if.ufrgs.br/~betz/iq_XX_A/fotoElec/aFotoElecText.htm)
- <http://www.fis.ufba.br/~edmar/fis101/roteiros/Fotoeletrico.pdf>
- [http://promadi.if.usp.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=15:efeito-fotoeletterico&catid=4:fisica-moderna&Itemid=2](http://promadi.if.usp.br/index.php?option=com_content&view=article&id=15:efeito-fotoeletterico&catid=4:fisica-moderna&Itemid=2)
- [http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod03/m\\_s03.html](http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod03/m_s03.html)
- [http://www.fisicaevestibular.com.br/exe\\_moderna1.htm](http://www.fisicaevestibular.com.br/exe_moderna1.htm)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric_effect)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Prussian\\_Academy\\_of\\_Sciences](https://en.wikipedia.org/wiki/Prussian_Academy_of_Sciences)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Gilbert\\_N.\\_Lewis](https://en.wikipedia.org/wiki/Gilbert_N._Lewis)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Secondary\\_emission](https://en.wikipedia.org/wiki/Secondary_emission)
- <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/o-efeito-fotoeletrico.htm>
- <http://www.gradadm.ifsc.usp.br/dados/20121/FFI0775-1/Efeito%20Fotoeletrico.pdf> (material completo)

# Aplicações

- *Células para painéis fotovoltaicos*

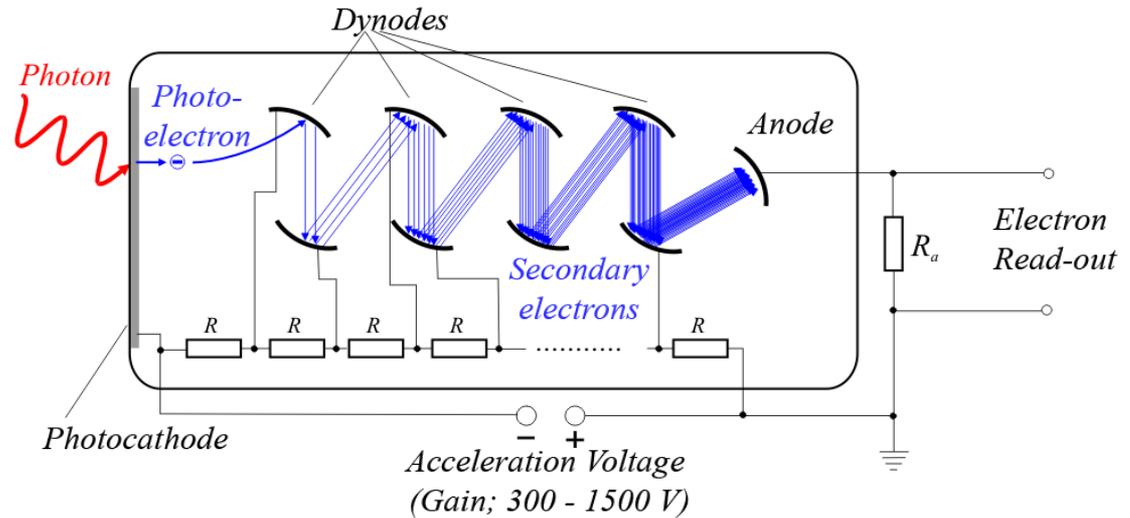


- *Relés*

Relés;  
Sensores de movimento;  
Fotorresistores.

# Aplicações

- **Fotomultiplicadores**



funcionamento das câmeras de TV, nos óculos de visão noturna, nos sistemas de desligamento automático de iluminação, nas portas que abrem e fecham automaticamente nos shoppings, nos relógios que funcionam com energia solar,